



## 埋設管ネットワークにおける耐震性評価手法の研究

小金丸健一<sup>1</sup>，鈴木信久<sup>2</sup>，森健<sup>3</sup>，清水善久<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京ガス(株) 千葉導管ネットワークセンター

kenici\_k@tokyo-gas.co.jp

<sup>2</sup>正会員 JFE 技研(株) 工博

<sup>3</sup>正会員 JFE エンジニアリング(株) ガス技術部

<sup>4</sup>正会員 東京ガス(株) 導管部 工博

### 要約

従来有限要素解析等の高精度な耐震性評価は、計算量が膨大になるため、面的に広がった埋設管ネットワークに適用することは現実的には不可能だった。そこで、埋設管ネットワークを直線区間と両端に接続する異形管からなるセグメントに分割し、そのセグメント毎に地震応答による変形を高速かつ高精度に算出し、許容される管体の変形量と比較することにより耐震性を評価する手法を研究した。この手法による計算精度は、有限要素解析と同等であるが、計算量は大幅に削減可能である。従来、ネットワークの耐震性評価において敷設線形の影響を簡易に評価することが難しかったため、予防対策箇所の選定を合理的に行うことは困難だったが、本手法により詳細かつ高精度に耐震性を評価できるようになるため、合理的な地震対策を実施することが可能となる。

**キーワード：**埋設管、ネットワーク、耐震評価、耐震対策

### 1. はじめに

高度に発達した都市にとって、ライフラインのひとつである都市ガスは、都市生活を送る上で欠くことのできない社会資本であると同時に、大規模地震発生時に被害が生じた場合には、火災等の二次災害拡大の原因にもなりうる。そのため都市ガス業界では、予防・緊急（二次災害を防止するために被害箇所の供給を停止する措置）・復旧対策の充実を図ってきた。しかしながら、1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災は、100万都市を震源とする直下型地震であり、他のライフライン、土木・建築構造物と同様に都市ガスにも過去に例を見ない被害が発生した。そのため各方面でさまざまな地震対策が実施され、都市ガス業界でもガス地震対策検討会報告書<sup>1)</sup>を始めとして、各種指針<sup>2),3)</sup>を取りまとめ、二度と同様な惨事が発生しないよう積極的な地震対策を行ってきた。その後2004年10月23日に発生した新潟県中越地震では、ガス地震対策検討会報告書に基づいた対策が効果を挙げたことが確認されている。<sup>4)</sup>

しかし現在、各ガス事業者は費用圧縮の観点から地震対策予算の削減を余儀なくされており、合理的な地震対策を実施し、対策費用を絞り込む必要性に迫られている。都市ガス事業者の地震対策は予防対策・緊急対策・復旧対策の3種類に分けられるが、特に埋設管の耐震化を進めて、地震時の被害そのも

のを低減させる予防対策は最も根本的な対策である。そのため一般的に供給ネットワークの最上流に当たる幹線系のネットワークは、詳細な耐震評価に基づいた十分な予防対策がなされており、実際に阪神・淡路大震災でも大阪ガスの幹線系ネットワークには被害は発生しなかった。一方需要家に直接ガスを供給する最下流のネットワークは、家屋の倒壊による被害が想定され、また需要家資産部分の配管の予防対策は、事業者では実施できないため予防対策の効果が低く、そのため緊急措置対策が採られている。両ネットワークの中間に属する供給ネットワークは面的に拡がっており、被害が発生した場合社会的にも影響が大きいことから、今後も予防対策が必要と考えられるが、そのためにはネットワークのどこが本当に対策が必要なのかを合理的に評価する必要がある。

## 2. 新しい耐震性評価手法の概要

一般的に合理的な予防対策を実施するためには、埋設管ネットワークをはり要素およびシェル要素で離散化し、地盤ばねを介して地盤変位を入力する有限要素解析等を用いた詳細な耐震性評価が必要であるが、面的に拡がっている埋設管ネットワークでは、計算量が膨大になるために現実的には不可能である。そのため、これまで面的に拡がった埋設管ネットワークの予防対策は、過去の被害事例に基づいて被害推定式を構築し<sup>5),6),7),8),9),10),11),12),13),14)</sup>、メッシュ単位のような面的な耐震性を評価した上で対策を実施するか、あるいは管体強度に基づいた対策を実施してきた。しかし従来の被害推定式は、耐震性の低いエリアは限定されてもそのエリアのどこに被害が発生するかは明らかにしない。また管体強度を予防対策の要否判断に用いると強度の低い埋設管は、全て予防対策が必要となる。しかし阪神・淡路大震災によるガス導管や水道管などの被害の実績<sup>1),6)</sup>を分析しても、たとえ強震動が発生している地域でも管体強度の低い埋設管が全て被害を受けているわけではなく、管体強度による評価は過剰な対策を強いる評価となることが分かる。

今回研究した図1に示す新しい耐震性評価手法は、埋設管の管体強度だけではなく、地盤の動的応答特性と敷設線形を考慮した供給ネットワークの地震応答を高速かつ高精度に算出し、各部材の管体強度と比較することにより耐震性を評価するものである。そのため耐震性の劣る箇所がピンポイントで明らかになり、合理的かつ効果的な予防対策を実施することが可能となる。このことは、社会資本として供給ネットワークを見た場合、二次災害の防止や復旧期間の短縮、環境負荷の低減、ライフサイクルコストの削減等非常に重要な意味を持つ。

本手法は、直管と曲管やT字管等の異型管が連続的に接続する埋設管ネットワークに適用可能である。そのためガス導管ネットワークや、構造的にガス導管と共通している上水道ネットワークに適用可能であるが、以下首都圏のガス導管ネットワークに適用した事例を用いて、第3章では地盤変位に対して埋設管に生じる外力を求め、第4章では、材料強度の設定の一例を示す。第5章では阪神・淡路大震災時における詳細な実被害データが示されている神戸市の上水道ネットワークを用いて解析手法の妥当性について検証を行う。また第6章では適用事例を紹介し、第7章では結論を述べる。

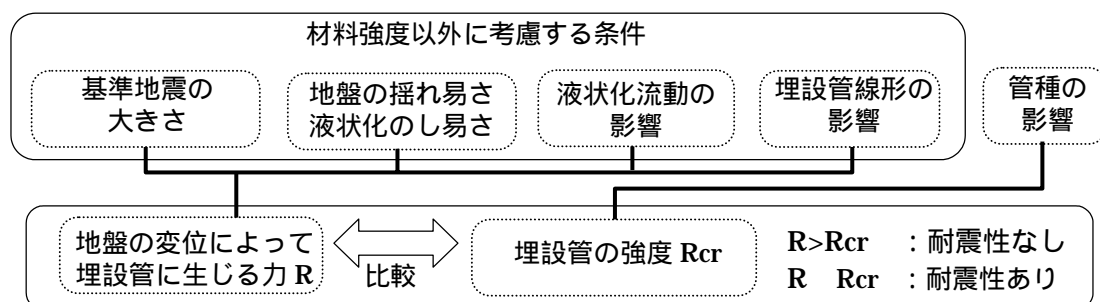


図1 耐震性評価方法の概要

### 3. 埋設管に生じる外力の計算

#### 3.1 埋設管ネットワークの離散化

埋設管に発生する外力は地盤の変位・歪によって生じる摩擦力であるが、実際に埋設管に生じる外力はネットワークの敷設線形や埋設管の口径あるいは地盤変形の方法によって異なる。

標準的な埋設管ネットワークにおいて最上流部の幹線系のネットワークは、比較的延長のある直線ラインで構成されることが多いため、無限長の直線パイプラインや90°曲管を含む半無限パイプラインを解析モデルとすることが可能である。しかし幹線系よりも下流のネットワークは、面的に広がっており、地震波長より短い直線区間に曲管あるいは分岐管が接続していることが多い。一例として今回解析を行った首都圏のガス導管ネットワークを図2に示す。

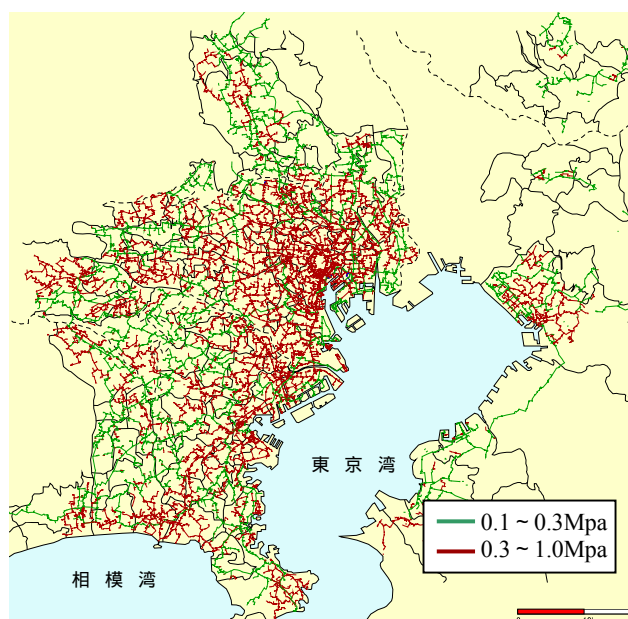


図2 首都圏のガス導管ネットワーク

一般的に、地震応答によって埋設管に生じる外力を高精度に求めるためには、埋設管ネットワークをはり要素およびシェル要素で離散化し、地盤ばねを介して地盤変位を入力する有限要素解析を行う必要があるが、上記のような供給ネットワークは、供給信頼性向上のために全ての埋設管要素が何らかの形状の埋設管で接続されているため、計算が非常に複雑となり、また、分割する要素数が膨大であるため有限要素解析を適用することは現実には不可能である。

そこでまず、計算を単純化するために全ての埋設管要素が連続して接続した状態ではなく、ネットワークを離散化して小さなセグメント（骨格となる直管とそれに接続する境界要素となる異型管）毎に計算する方法を開発した。図3に示すネットワークを例にとってモデル化と変形解析の基本的な考え方を概説する。図のネットワークはY軸方向に300m、X軸方向に200mの範囲に展開しており、埋設管の口径は150mmと200mmである。図3では、地震波として高圧ガス導管設計指針<sup>2)</sup>で採用されている表面波がネットワークの左から入射し、右方向に伝播している。表面波の波長は200m、振幅は10cmである。

本論文に示す埋設管ネットワークの変形解析手法の特徴は、ネットワークをセグメントに分割し、セグメントの変形を個別に解析することである。ネットワークを離散化するセグメントは、ネットワークの直管部分を骨格とし、骨格の両側に接続する曲管や分岐管およびそれらに接続する直管の一部で構成される。図3のネットワークの場合、分割するセグメントは3つ（Seg. 1、Seg. 2、Seg. 3）に集約することができる。すなわち直管+曲管、直管+T字管、直管+曲管およびT字管である。

ネットワークをセグメントでモデル化して変形解析する方法の妥当性を検証するため、図3のネットワーク全体をはり要素でモデル化し、有限要素解析でネットワーク全体の変形を計算した。地盤ばね特性は高圧ガス導管耐震設計指針<sup>2)</sup>のデータを採用した。有限要素解析によるネットワーク全体の計算結果のうち、Seg. に対応するネットワークの軸歪分布と曲げ歪分布を図4に示す。図4の軸歪分布図に示すように、直管の最大軸歪は約0.15%であり、両端の曲管部分では軸歪が減少している。また、曲管および曲管に接続する直管には軸歪が発生していないことが分かる。図4の曲げ歪分布図では、直管の中央部には曲げ歪が発生しておらず、曲管付近で最大約0.1%の曲げ歪が発生している。この曲げ歪は、曲管に接続する直管部分に沿って約10m離れたところで減少している。

図4の歪分布を要約すると、直管には軸歪、曲管および曲管に接続する直管には曲げ歪が卓越するが、曲げ歪は曲管から10m程度離れたところでほとんど減少している。このことから、ネットワーク内でSeg. に該当する一部分を切り取っても、ネットワーク全体の変形には、ほとんど影響を及ぼすことがないことが分かる。さらに、ネットワークから切り取ったSeg. の変形を単独で計算しても、ネットワーク全体をモデル化して有限要素法で計算した結果とほぼ同様な結果が得られることが分かる。Seg. 、Seg. もSeg. と同様な傾向を示している。また、同様な検証を表面波の波長を800mまで、地震波の振幅を40cmまで変化させて行ったところ、上述の検証と同様な結果が得られた。軸歪は管軸方向の地盤拘束力により生じるため、中央の直管にのみ生じるのは容易に想像がつく。また曲げ歪については、地盤と埋設管のすべりにより地盤拘束力の大きさが一定になるため、主に骨格の直管が異型管を引っ張るあるいは圧縮することにより生じ、直管と異型管の接続部にのみ生じると考えられる。

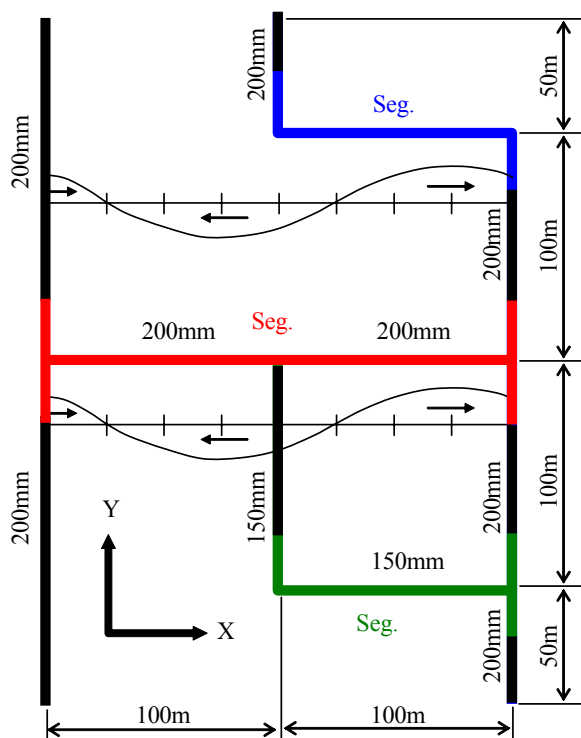


図3 解析に使用したネットワークおよび地震波

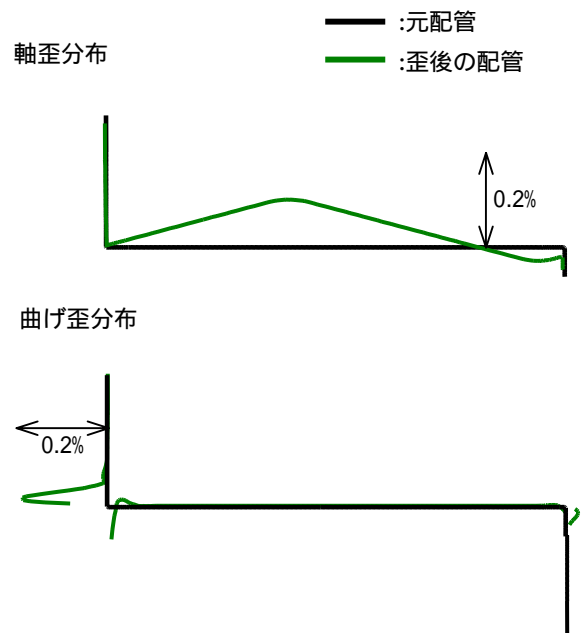


図4 軸歪と曲げ歪の有限要素解析結果

### 3.2 セグメントに発生する軸力

埋設管ネットワークを異型管 + 直管 + 異型管というセグメントに離散化することにより、境界要素である異型管を跨いだ埋設管の影響を無視することが可能となり、それぞれのセグメント毎の計算を単純化することが可能となった。しかし、有限要素解析を実施する場合、ネットワーク全体としては分割する要素数は変わらない。そのため有限要素解析を実施するにはやはりまだ膨大な労力が必要となる。

そこで骨格の直管に発生する軸力を直管に作用する地盤拘束力とその両端の境界要素によって生じる軸力に分割して考えることとした。

図5の最上段の図は、セグメントの基本構成と地盤変位分布の関係を示したもので、 $u_g$ は地盤変位であり、 $U_h$ は変位振幅である。図5の中段の図は、直管および直管の両端に接続する曲管を境界要素として、単一の非線形スプリングでモデル化したもので、 $B_R$ 、 $B_L$ はそれぞれスプリングにモデル化した境界要素の変位である。さらに最下段は、管軸方向の地盤ばね特性を剛塑性モデルとしているために、パイプには地盤の変位に関わらず一定の摩擦力が作用することを表現したものであり、 $F_{BR}$ 、 $F_{BL}$ はそれぞれ左右の境界要素の反力である。

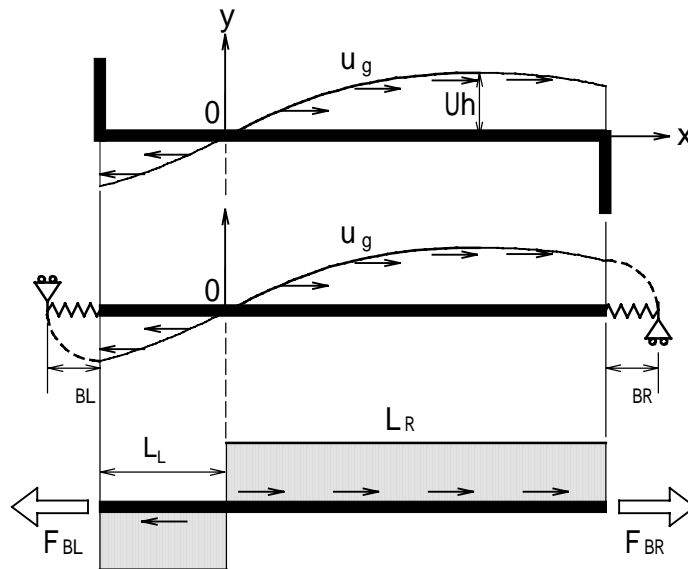


図5 セグメントの基本構成と地盤変位分布の関係

ここで管の $x>0$ の範囲に作用する軸力 $F_R(x)$ は式(1)で表される。

$$F_R(x) = f_\tau(L_R - x) + F_{BR} \quad (1)$$

$L_R$ は右側直管部分の長さ、 $F_{BR}$ は右側境界要素の反力、 $f_\tau = \pi D \tau$  ( $D$ :埋設管の口径、 $\tau$ :地盤拘束力)である。式(1)の右辺第1項が直管に作用する地盤拘束力であり、第2項が境界要素によって生じる軸力である。 $F_R(x)$ を埋設管の断面積 $A$ で除することにより、軸応力 $\sigma_R(x)$ が求まる。ここで埋設管の応力歪曲線を、弾性変形域から塑性変形域まで単一の式で表現できるRamberg-Osgood式で表すと

$$\varepsilon_R(x) = \frac{\sigma_R(x)}{E} + \frac{\alpha \sigma_R(x)^N}{E \sigma_0^{N-1}} \quad (2)$$

となる。ここで $E$ は埋設管のヤング率、 $\sigma_0$ は降伏応力(API材の場合は0.5%歪に相当する応力)、 $N$ は材料の歪硬化特性によって決定されるRamberg-Osgoodの定数である。これを $x$ について積分することにより、式(3)に示すように埋設管の変位を求めることができる。

$$u_{PR}(x) = \int_0^x \varepsilon_R(x) dx \quad (3)$$

ここで $x=L_R$ を代入すると右側境界要素に接続する直管端部の変位が式(4)のように求められる。

$$u_{PR}(L_R) = \frac{L_R}{EA} \left\{ f_\tau \frac{L_R}{2} + F_{BR} \right\} + \frac{\alpha \left\{ (f_\tau L_R + F_B)^{N+1} - F_B^{N+1} \right\}}{(N+1) f_\tau EA^N \sigma_0^{N-1}} \quad (4)$$

さらに、右側境界要素から直管に作用する反力は式(5)のように表される。ここに、 $K_{BR}$  は境界要素の変形特性を表す非線形ばね係数で、非線形地盤反力特性と埋設管の非線形変形特性を合成したものである。

$$F_{BR} = K_{BR} \{ u_{gR}(L_R) - u_{PR}(L_R) \} \quad (5)$$

また、地盤と埋設管の相対変位  $\delta_{BR}$  は式(6)のように表されるため、式(4)に代入して  $\delta_{BR}$  について整理すると、 $\delta_{BR}$  に関する非線形方程式が式(7)のように得られる。

$$\delta_{BR} = u_{gR}(L_R) - u_{PR}(L_R) \quad (6)$$

$$\delta_{BR} = \frac{1}{EA} \left[ EA u_g(L_R) - \frac{f_\tau L_R^2}{2} - K_{BR} L_R - \frac{\alpha \left\{ (f_\tau L_R + K_{BR} \delta_{BR})^{N+1} - (K_{BR} \delta_{BR})^{N+1} \right\}}{(N+1) f_\tau A \sigma_0^{N-1}} \right] \quad (7)$$

左側境界要素についても同様に求めると式(8)となる。

$$\delta_{BL} = \frac{1}{EA} \left[ EA u_g(L_L) - \frac{f_\tau L_L^2}{2} - K_{BL} L_L - \frac{\alpha \left\{ (f_\tau L_L + K_{BL} \delta_{BL})^{N+1} - (K_{BL} \delta_{BL})^{N+1} \right\}}{(N+1) f_\tau A \sigma_0^{N-1}} \right] \quad (8)$$

式(7)および(8)の未知数は  $\delta_{BR,L}$  と  $K_{BR,L}$  であるが、この関係は境界要素の有限要素解析により得られるため、非常に計算が膨大となる。しかし供給ネットワークの境界要素は、その形状、口径、材料等の組み合わせで決まる有限のパターンになるため、モデル化が可能である。そのため予めモデル化した境界要素の変位 - 軸力特性および変位 - 歪特性等を有限要素解析により求めておき、その結果をデータベース化することによって計算量を大幅に削減することを検討した。一例として表1に曲管についてデータベース化するモデルを示す。形状が比較的単純なため、代表的な組み合わせのみ解析を実施し、その他の組み合わせは内挿によりデータを推定した。なおT字管については、母管軸方向の荷重と枝管軸方向の荷重で変形が異なるために2種類のデータベースを作成している。また6°未満の曲がりについては、あらかじめ詳細解析を実施し、直管とみなしても影響がないことを確認してある。

境界要素の変位 - 荷重特性および変位 - 歪特性を予めデータベース化することにより、 $\delta_{BR}$  と  $K_{BR}$  の関係を有限要素解析を実施せずに求めることが可能となり、大幅に計算量を削減することが可能となる。この特性を用いることにより式(7)、(8)は  $\delta_{BR,L}$  に関する非線形方程式として解くことが可能となる。

解析結果の一例として曲管の変位 - 荷重特性を図6に示す。

表1 曲管の境界要素のデータ作成パターン

口径 [mm]	曲管の角度	
	90°	6°以上90°未満*
100		←
125		←
150		←
200		←
250		←
300		←
350		←
400		←
500		←
600		←
650		←
750		←

.....有限要素解析によりデータ作成  
 .....他の口径から内挿補間  
 .....曲管の角度比により調整

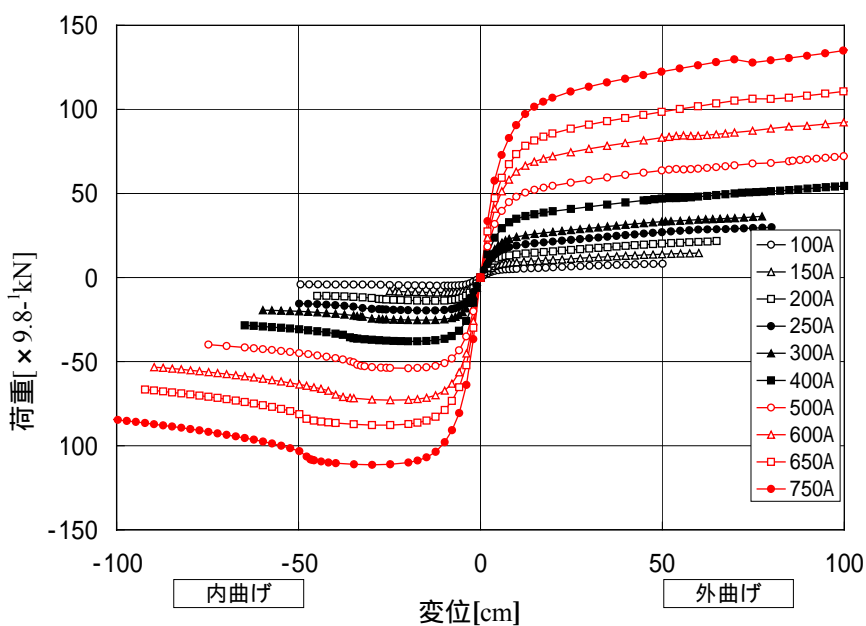


図6 曲管の変位 荷重特性

### 3.3 計算量と計算精度

計算量の比較のために実存する3,000セグメント程度の供給ネットワークで有限要素解析と本手法による計算を実施した。なお有限要素解析にはFUJITSU-VX (スーパーコンピューター 4.4GFLOPS) を使用し、本手法による解析にはDELL Dimension XPSR400 (デスクトップPC 10MFLOPS程度) を使用した。有限要素解析では埋設管をはり要素とシェル要素に離散化するため1つのセグメントでも節点は数百から数千になり自由度は数千から数万にもなる。一方本手法は、1つのセグメントについて未知変数は2つ ( $K_{BR,L}$  と  $K_{BR,R}$ ) であるため、表2に示すように、計算機の性能の違いがあるにも係わらず従来の有限要素解析と比較すると計算時間は約1/10,000以下となり、計算量を大幅に削減することが可能となった。



表2 本手法と有限要素解析の解析時間の差異

	本手法	有限要素解析
解析に要した時間	2分/3,000セグメント	5～10分/セグメント (全セグメントで10～20日)
比率	1	7,500～15,000

次に計算精度を求める。解析モデルは図3に示したネットワークとし、計算条件に対応する地震波の位相および節点番号を図7に示す。また地盤の固有周期により入力地震動の波長は変わるため、ここでは、200m, 300m, 400mの3種類の波長を設定した。計算結果として直管の両端における変位を表3に示した。計算誤差は本手法と有限要素解析による変位の差を有限要素解析の変位で除した絶対値を記述している。各計算結果とも本手法による計算結果は、有限要素法の解と良好に一致しており、誤差は0.1～11.1%である。これらのうち、11.1%の誤差はCase2-2の で生じているが、200mの管路に対し計算誤差が0.1cmと小さいことから計算結果としては十分な精度と考えることができる。

この手法により複雑な埋設管ネットワークの変形を短時間の間に実用上十分な精度を保ちながら解析すること可能であることが明らかとなった。

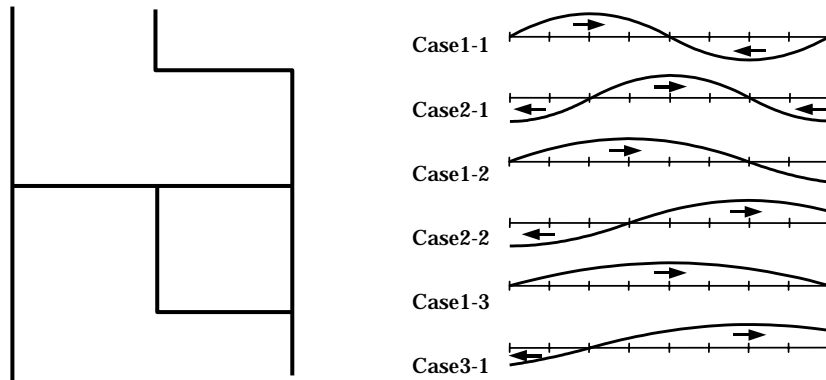


図7 シミュレーション条件

表3 本手法と有限要素法による結果の比較

節点	Case1-1 [波長200m]			Case1-2 [波長300m]			Case1-3 [波長400m]		
	B[cm]			B[cm]			B[cm]		
	本手法	従来	誤差[%]	本手法	従来	誤差[%]	本手法	従来	誤差[%]
	-10.42	-10.55	1.2	-14.91	-14.92	0.1	-3.96	-3.97	0.3
	10.41	10.52	1.0	-14.91	-14.92	0.1	-11.40	-11.49	0.8
	2.57	2.49	3.2	5.28	5.41	2.4	7.51	7.89	4.8
	2.57	2.49	3.2	-15.06	-14.80	1.8	-7.51	-7.88	4.7
	-7.56	-7.94	4.8	-20.10	-20.04	0.3	-6.04	-6.03	0.2
	5.99	5.60	7.0	-7.06	-7.02	0.6	6.71	-6.54	2.6
節点	Case2-1 [波長200m]			Case2-2 [波長300m]			Case2-3 [波長400m]		
	B[cm]			B[cm]			B[cm]		
	本手法	従来	誤差[%]	本手法	従来	誤差[%]	本手法	従来	誤差[%]
	-17.59	-17.60	0.1	5.56	5.54	0.4	11.40	11.41	0.1
	-17.59	-17.60	0.1	-5.54	-5.55	0.2	3.98	4.00	0.5
	8.21	8.75	6.1	12.26	12.27	0.1	5.98	5.94	0.7
	-8.21	-8.74	6.1	-0.80	-0.90	11.1	5.98	5.94	0.7
	-25.49	-25.47	1.8	4.76	4.74	0.4	12.11	12.09	0.2
	-6.60	-6.96	5.2	3.09	-3.07	0.5	1.63	1.64	0.6



#### 4 . 管体強度の設定

前章までで地盤変位が与えられた場合に各セグメントに生じる外力を求めることが可能となった。耐震性を照査するためには、外力に対してセグメントの強度が必要となる。今回解析を行ったガス導管ネットワークで用いられている管種は溶接鋼管、鋳鉄管等があり、他の付属部材として溶接バルブ、鋳鉄バルブ等がある。それぞれの管体毎に強度を設定する必要があるが、阪神・淡路大震災における中圧ガス導管の被害は、主に鋳鉄バルブのフランジ継手部分に発生している<sup>1)</sup>ため、本論文ではフランジ継手の強度設定について述べる。

##### 4 . 1 実験概要

文献等ではフランジ継手の被害モードが不明だったため、本試験に先立ち、単純な圧縮試験と引張試験を実施した。その結果、圧縮については試験機との接続の治具として付けた鋼管が座屈し、試験体には損傷が生じなかったことから、レベル2地震のような強震動でもフランジ継手は圧縮による被害は生じないと考えられることが明らかとなった。

また引張試験では、荷重を大きくするに従い、最初に一度漏洩が発生しても荷重を除荷すると漏洩は停止し、次に荷重を除荷しても漏洩がとまらない状態となり、更に荷重を大きくするとボルト、フランジあるいはバルブ本体が破壊することが分かった。それぞれの状態になる荷重を初期漏洩荷重、漏洩停止限界荷重、破壊荷重と呼ぶこととする。初期漏洩荷重では、ボルトおよびフランジは弾性を保っており、地震の最中のみ漏洩が発生すると考えられるため、今回は漏洩停止限界荷重と破壊荷重の2種類の荷重を求めることとした。そのため軸力を載荷した後、少しずつ荷重を大きくしながら荷重の載荷 - 除荷を繰り返して限界漏洩荷重を確認した。なお、漏洩の有無は荷重の除荷後に0.1MPaまで試験体を加圧し、気密性を確認することで判定した。

##### 4 . 2 強度の設定

試験結果の一例として、口径300mmのフランジバルブの引張試験結果を図8に示す。材料強度を実験で求める場合、最低値を採用するのが望ましいが、図8の結果から同タイプのフランジでは、個体によるばらつきは少ないことが明らかとなったため、実験の最低値に相当する値を統計的に求めることとした。しかし全ての口径で多数の実験を実施することは困難であるため、比較的簡便に実施できる口径150mmのフランジ単体の引張試験を多数実施し、平均値-2（標準偏差）の値を実験による最低値とすることとした。またこの値が平均値の87.3%となったため、他の口径についても実験値の平均値の87.3%を材料強度として設定した。

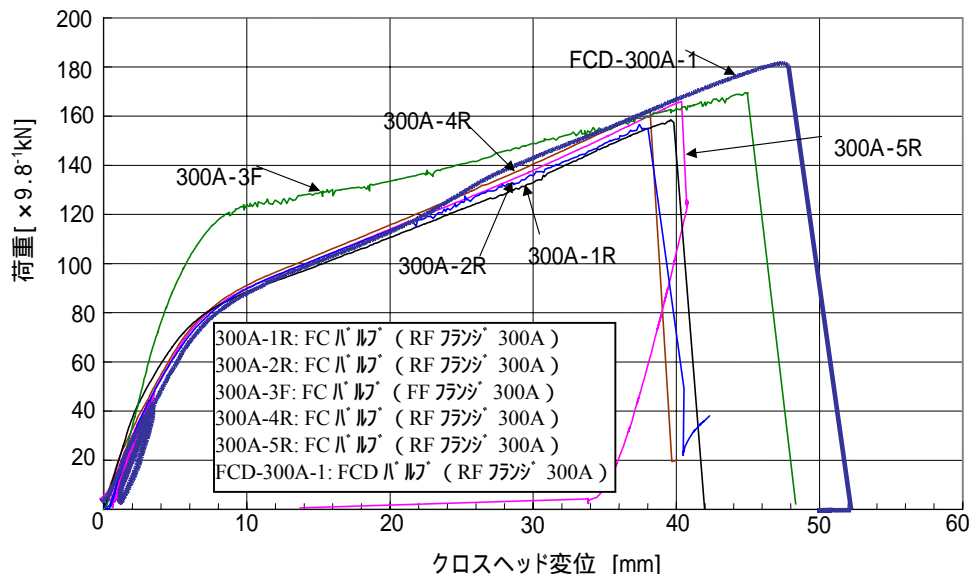


図8 フランジバルブの実験による変位 - 荷重曲線

## 5 . 本手法の妥当性の検証

阪神・淡路大震災時には、上水道も非常に大きな被害を受けており、詳細な調査が実施されている。<sup>6)</sup> また上水道ネットワークは、ガス導管ネットワークと構造的に共通している。そこで神戸市水道局より提供された調査結果データを元に、本研究の耐震評価手法の妥当性を神戸市の上水道ネットワークを用いて検討することとした。提供されたデータは、阪神・淡路大震災当時の上水道管路のマッピングデータおよび被害データである。そこで図9のフローに基づき、阪神・淡路大震災時の地震動データを外力とした解析を実施し、実際の被害と比較することにより本手法の妥当性を評価することとした。

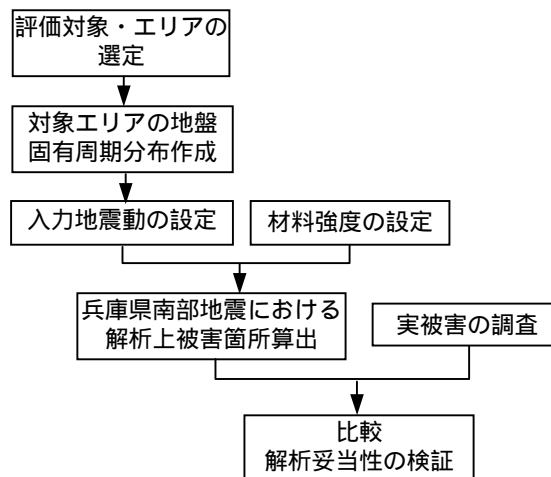


図9 妥当性検証フロー

### 5 . 1 評価対象

耐震評価手法の検証を行うためには、“被害が発生していない”箇所を特定する必要もあるが、神戸市水道局から提供されたデータには、被害が発生した箇所のみ記録されている。そのため記録が無い箇所については、被害が生じていないのか、そもそも対象となる設備が無いのか区別が付かない。そこで今回の検証にはバルブデータは使用しないこととし、面的に一様に分布しており、被害が生じていない場所には、健全な継手が存在しているとみなすことのできる鑄鉄管の継手部について検証を行った。

また断層近傍では特殊な地盤変動があると考え、さらに液状化による地盤変位を評価するためには護岸データ等が必要であるが<sup>15)</sup>、それらを整備するのが困難であるため、検討するエリアをそれらの影響が少ないと考えられるエリアに限定した。

### 5 . 2 神戸市内の地震動分布

耐震性の評価を実施するには、外力となる地震動を求める必要がある。前章で述べたように、本手法では地盤変位  $u_g$  が必要であり、式(9)のように表すことができる。

$$u_g = \frac{V \cdot Tg}{2\pi} \quad (9)$$

ここで  $V$  は地表面における地震動の最大速度、 $Tg$  は地盤の固有周期である。そのため神戸市の最大速度分布および地盤固有周期分布を求めることとした。阪神・淡路大震災時の神戸市内の最大速度分布は地震計データを補間したものや建物被害分布などから推定したもの等数多く発表されているが、ここでは山口ら<sup>16)</sup>の求めた速度分布を用いた。また地盤固有周期は神戸 Jibankun<sup>17)</sup>のボーリングデータを用いて算出した。ボーリング地点の固有周期はボーリングデータの  $N$  値、表層地盤厚さ、土質種別を元に道路

橋示方書<sup>18)</sup>の方法により算出し、ボーリングが存在していない地点においては、式(10)に示す距離の2乗の重み付けによる補間により固有周期を求めた。

$$T_g = \frac{\sum_i \left( \frac{1}{r_i^2} T_{g_i} \right)}{\sum_i \left( \frac{1}{r_i^2} \right)} \quad (10)$$

ここで  $T_g$  は計算地点の地盤固有周期の補間値、 $T_{g_i}$  は補間に用いる地点の値、 $r_i$  は計算地点と補間に用いる地点の距離を表す。このようにして補間した神戸市の面的な固有周期分布を図10に示す。

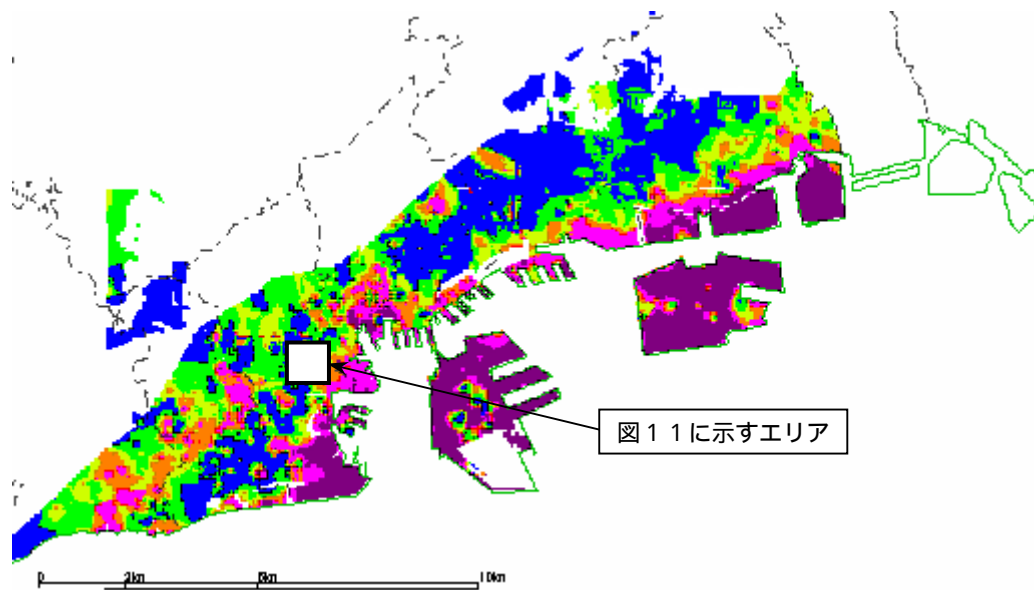


図10 神戸市内固有周期分布

### 5.3 材料強度の設定

ガス導管と水道管部材の強度は求められる機能が異なるため当然異なる。そのため今回水道管被害の検証を行うために鑄鉄水道管の継手部の引張り試験を実施し、合わせて境界要素のデータベースを作成するための基礎データとして継手部の曲げ試験も実施した。参考として試験の様子を写真1に示す。



写真1 継手引張り強度確認試験

#### 5.4 解析精度の検証

解析では、あるセグメントで被害が発生すれば同条件（同口径・同管種・同延長・同境界条件・同地震動・同固有周期地盤）のセグメントは全て被害が生じていることになる。しかし現実には、同条件のセグメントでも被害が生じる場合と生じない場合がある。本解析手法は予防対策の必要性を判断するためのものであり、被害箇所を見逃さないようにする必要がある。そこで実被害のあったセグメントと同条件のセグメントは、実際には被害が生じていなくとも被害が生じているとして扱った”みなし被害”を導入し、解析結果と比較することとした。図11に解析結果と実被害およびみなし被害の分布の一例として長田区の結果を示す。地震動の大きさは図11のエリアの北半分は130~140kine、南半分は175kineであり、地震動と被害の相関は見られないが、みなし被害も含んだ実被害と解析被害の発生している位置は概ね重なっている。表4に実被害と解析被害の比較による本手法の精度を示す。

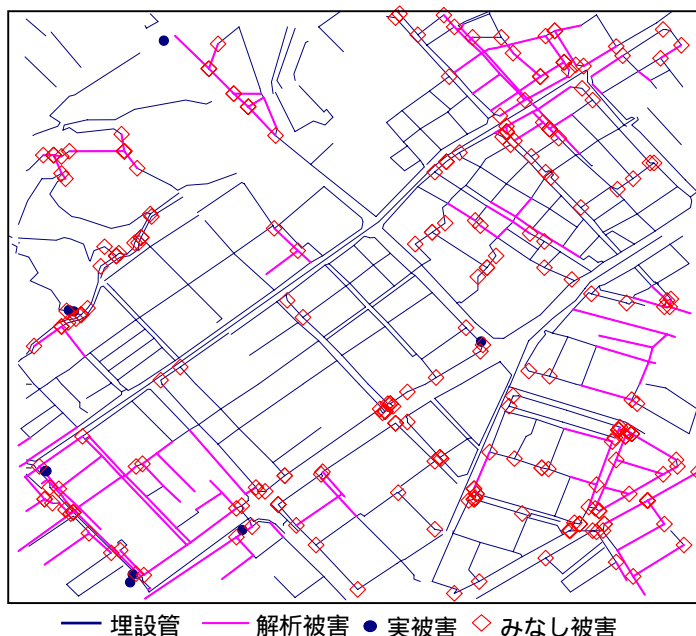


図11 解析結果と実被害およびみなし被害の分布

表4 解析結果と実被害およびみなし被害の比較

実被害+みなし被害		実被害+みなし被害無		被害有 正解率 A/(A+C)	被害無 正解率 D/(B+D)	正解率 (A+D)/(A+B+C+D)
解析被害有 A	解析被害無 B	解析被害有 C	解析被害無 D			
1,480 セグメント	285 セグメント	815 セグメント	687 セグメント	64.5%	70.7%	66.3%

本手法での解析上被害が予想されるセグメントは、実被害あるいはみなし被害が概ね発生しているが、表4からも明らかなように、解析上の被害の方が実被害とみなし被害の和よりも多い。これは、今回の解析では全ての管種が一般的な継手として設定しているが、実際には耐震継手も用いられていること、また地震動の入力方向が全て管軸方向という最も厳しい条件で解析がされていること、および本手法が設計上の安全率を含んだものであるためであると考えられる。これらのことを考慮すると、本手法が実用上必要十分な精度を持っていると考えられる。

## 6. 適用事例

要予防対策箇所を求めるには、基準地震動および許容値は政策あるいは準拠する基準に合わせる必要があるが、本手法はそれらの設定値を任意に変えることが容易である。そのため構造的に共通している上水道およびガス導管ネットワークの耐震性評価手法として幾つかのガス事業者および水道局で適用されている。なお首都圏のガスネットワークに適用した結果は、従来の手法に対し要予防対策箇所を約 1/10 に合理的に絞り込むことが可能となり、地震対策の進捗を飛躍的に進めることが可能となった。さらに本解析手法では、要予防対策箇所がピンポイントで把握できるようになるため、繁華街などの周辺環境を加味することにより現在保有しているリスクも明らかすることが可能となる。

また入力する地震動をリアルタイムで観測される地震動にすることにより、高精度なリアルタイム被害推定を行うことも可能であり、地震時のリアルタイム防災システム”SUPREME”<sup>19)</sup>にも本手法による被害推定システムが搭載されている。

## 7. 結論

従来面的に広がった埋設管ネットワークの耐震性評価は、過去の地震被害に基づいた被害推定式を適用する方法や、管体強度から推定する方法があったが、合理的に予防対策箇所を抽出することは不可能であった。そこで有限要素解析と同程度の精度を保ちながら計算量を大幅に削減する面的な供給ネットワークの耐震診断を行う手法の研究を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

供給ネットワークの地震応答による変形を求める場合、異型管を挟んだ直管同士は互いに影響を及ぼさないため、異型管で離散化したセグメント毎に解析を行うことが可能である。

供給ネットワークを離散化すると、計算は単純化されるが計算に必要な要素数は減少しないため、予め境界要素の変形特性をデータベース化する手法を考案した。

本手法は、従来の有限要素解析と同等の精度であるが、計算に要する時間は 1/10,000 以下である。

本手法を阪神・淡路大震災時の神戸市の上水道に当てはめたところ概ね地震時の被害を表すことができ、実用上十分な精度を持つ。

本論文の研究内容により、要予防対策箇所を合理的に抽出することが可能となる。

## 謝辞

本研究にあたって安田進東京電機大学教授、山崎文雄千葉大学教授、日本技術開発の磯山龍二氏、石田栄介氏、基礎地盤コンサルタンツの森本巖氏、亀井祐聡氏に多大なご協力を頂いた。また神戸市水道局には貴重なデータを提供していただいた。記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) ガス地震対策検討会編・資源エネルギー庁監修：ガス地震対策検討会報告書、1996年
- 2) 社)日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針、2000年
- 3) 社)日本ガス協会：高圧ガス導管液状化耐震設計指針、2001年
- 4) 社)日本ガス協会：新潟県中越地震ガス地震対策調査検討会(第2回)、2005年  
<http://www.meti.go.jp/committee/materials/g50517aj.html>
- 5) 久保慶三郎、片山恒雄：地下埋設管の被害 - 東京区部における地震被害の想定に関する報告書、東京都、1978年、pp.229-260.
- 6) 日本水道協会：1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析、1996年、pp.190.
- 7) 高田至郎：地震災害の特徴 - ライフライン施設の被害 -、地震防災の事典、2000年、pp.226-248.
- 8) 北浦勝、宮島昌克：液状化に伴う地盤の永久変位を受ける地中埋設管の挙動に関する研究、構造工学論文集、Vol.33A、1987年、pp.679-686.

- 9) 佐藤紘志：埋設管路の弾塑性解析とその応用に関する研究、東北大学学位論文、1985年、pp.185.
- 10) 西尾宣明：埋設管の地震被害予測法に関する研究、東北大学学位論文、1989年、pp.219.
- 11) 鈴木信久：地盤の永久変位を考慮した埋設パイプラインの耐震設計に関する研究、東北大学学位論文、1995年、pp.235.
- 12) 濱田政則、安田進、磯山龍二、江本克利：液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究、土木学会論文集、No.376、1986年、pp.221-229.
- 13) O'Rourke, T. D., Stewart, H. E., Blackburn, F. T. and Dickerman, T. S. : Geotechnical and and Lifeline Aspects of the October 17, 1989 Loma Prieta Earthquake in San Francisco, Tech. Rep. NCEER-90-0001, 1990.
- 14) 細川直行、渡辺孝仁、清水善久、小金丸健一、小川安雄、中濱新吾、磯山龍二：地盤条件を考慮した低圧ガスねじ継手鋼管の被害率予測式の検討、土木学会地震工学研究発表会、2001年
- 15) 松本浩一、安田進、清水善久、小金丸健一、入澤恒裕：東京低地の護岸背後地盤における流動の簡易解析、土木学会年次学術講演会講演概要集第3部(A) Vol: 56、2001年
- 16) 山口直也、山崎文雄：1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定、土木学会論文集、No.612、1999年 pp.325-336.
- 17) <http://www.kobe-toshi-seibi.or.jp /matisen / jibankun>
- 18) 社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編、1980年
- 19) 清水善久、石田栄介、磯山龍二、山崎文雄、小金丸健一、中山渉：都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用、土木学会論文集 No.738/I-64、2003年、pp.283-296.

(受理：2005年12月13日)

(掲載決定：2006年5月23日)

# **RESEARCH OF EARTHQUAKE RESISTANCE EVALUATION METHOD FOR SUPPLY NETWORKS**

KOGANEMARU Kenichi <sup>1)</sup>, SUZUKI Nobuhisa<sup>2)</sup>, Mori Takeshi<sup>3)</sup> and  
SHIMIZU Yoshihisa<sup>1)</sup>

- 1) Member, Tokyo Gas Co., Ltd
- 2) Member, JFE R&D Corporation
- 3) Member, JFE Engineering Corporation

## **ABSTRACT**

The seismic resistance of buried pipeline was conventionally evaluated only by the strength of material used for the pipeline. Consequently, the buried pipeline with weak-strength material was recognized as the pipe to be replaced or to be reinforced. Therefore, the conventional method could be over-investment if it is used for the determination of replacement / reinforcement plan.

Here, it is obviously important to develop the new seismic resistance evaluation method for buried pipes where both the soil conditions and the network shapes are taken into consideration, in order to make the replacement / reinforcement plan to be effective.

In this new method, the seismic resistance of the buried pipes can be evaluated reasonably through comparison between the strength of the buried pipes and the external forces on the pipes induced by design earthquake motion.

*Key Words : Pipeline, EARTHQUAKE RESISTANCE EVALUATION METHOD*